

УДК 338.2+621.9
DOI: 10.12737/24948

Е.Ю. Степанова, О.Г. Кожус, Г.В. Барсуков

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕЗАНИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУЕЙ ЖИДКОСТИ: ЭКОНОМИКА, РЫНОК, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Описываются проблемы перехода к экономике знаний. Анализируются достоинства новых инновационных технологий резания. Дается обзор состояния мирового рынка ГАР, тенденций и драйверов его развития. Приводятся примеры последних инноваций в этой области, данные о ведущих

компаниях - производителях гидрорежущего оборудования.

Ключевые слова: инновационные технологии резания, сравнительный анализ, гидрорежущее оборудование, тенденции развития, драйверы рынка, перспективы применения.

E.Yu. Stepanova, O.G. Kozhus, G.V. Barsukov

INNOVATION CUTTING TECHNOLOGIES WITH SUPERSONIC LIQUID JET: ECONOMY, MARKET, STATE AND DEVELOPMENT OUTLOOKS

The paper reports the description of problems in the transition to knowledge economy. The renaissance of mechanical engineering and defense industry complex (DIC) is impossible without development and use of new innovation industrial techniques. One of the modern techniques of material processing is hydrocutting at supersonic speeds which belongs to a number of the most dynamically developing means of material cutting making a significant competition to such common techniques as gas- and electro-erosion-, laser- and

plasma cutting and also to machining. The advantages of new innovation techniques are analyzed. The analysis of the world market of HAC, trends and drives of its development is given. The examples of the latest innovations in this field are shown, the information of leading company-manufacturers of hydro-cutting equipment with its brief performance data is shown.

Key words: innovation cutting techniques, comparative analysis, hydrocutting equipment, development trends, marker drives, application outlooks.

Введение

Россия унаследовала сырьевой характер экономики. Ситуация, связанная с ее переходом к экономике знаний, остается достаточно острой и проблематичной. Доминирование отраслей, связанных с ТЭК, особенно при высоких ценах на нефть, не стимулирует внедрение инноваций, несмотря на принимаемые государством меры. Доля предприятий, внедряющих инновации, по данным Росстата, в 2013 г., например, в обрабатывающих производствах не превышала 11,9% (в странах ЕС эта цифра достигает 40-60% [1]). Принципиально новую продукцию пока внедряют менее 0,5% компаний. В развитых странах этот показатель в 10 раз больше [2].

В свою очередь, накладывают негативный отпечаток санкции и различного рода экспортные ограничения западных стран [3; 4]. В таких условиях необходимо использовать сложившиеся обстоятельства для развития собственных производств, технологий и оборудования, особенно в

отраслях, определяющих технологическую безопасность и независимость страны. Не вызывает сомнения, что реализация намеченного возможна лишь при развитии наукоемких отраслей и высоких технологий [5]. Инновационной стратегии развития экономики страны альтернативы не существует [6-8]. Падение цены на нефть должно стать дополнительным отрезвляющим фактором и главным стимулом и катализатором структурной перестройки экономики.

Возрождение большинства отраслей машиностроения и ОПК невозможно без появления новых инновационных производственных технологий.

Одним из наиболее популярных и современных методов обработки материалов является гидрорезание на сверхзвуковых скоростях [9-11]. В СМИ и научных работах его называют «водорезкой», «гидрорезкой», «акварезкой», «ультраструйной обработкой», «водоструйным резанием»,

«гидролазером», «водяным лучом», «водяной пилой», «гидроножом», «гидроскальпелем» и т.п.

Технология гидроабразивной резки (ГАР) устанавливает новые стандарты в возможностях реализации проектов различной сложности, лидируя в сфере обработки материалов. На сегодняшний день она относится к числу наиболее динамично развивающихся способов раскроя материалов, составляя серьезную конкуренцию таким традиционным технологиям, как лазерная и плазменная резка, а также механическая обработка. Можно с уверенностью утверждать, что гидроабразивная резка – это существенный прорыв в технологии резки твердых и сложных по структуре материалов в широком диапазоне толщин (до 400 мм) с высочайшим качеством и точностью обработки. Применение технологии ГАР позволяет производить широчайший спектр качественных изделий с минимальными затратами в различных областях промышленности [12].

С целью повышения режущих свойств и производительности процесса в струю воды добавляется абразивный песок - гранат.

Возможности резания струей жидкости были открыты в СССР еще в 1957 году, а первый патент в этой области, как это у нас часто случается, зарегистрирован в США в 1961 году.

За прошедшие годы развитие технологии гидрорезания прошло путь от использования на операциях раскроя материалов с большими допусками, например в заготовительном производстве и раскрое подгузников, до сверхпрецизионной обработки в наукоемких секторах.

Постепенно гидроабразивное резание стало вытеснять известные технологии резки на гильотинных ножницах, прессах, ленточнопильных станках, газокислородную, плазменную и даже лазерную резку.

Сравнительный анализ наиболее распространенных технологий резки представлен в табл. 1. Стоимость оборудования, услуг, производительность могут отличаться в ту или иную сторону в зависимости от точности и производительности станков, габаритов заготовок, которые можно на них установить, требований к точности размеров изделий и качеству их поверхностного слоя, вида расходных материалов и т.п.

Таблица 1

Сравнение технологий резки материалов

Параметры способа	Резка				
	Гидроабразивная	Лазерная	Плазменная	Газокислородная	Электроэроз. проволокой
Стоимость оборудования	160000-180000€	200000-250000 €	120000-160000 €	25000-450000€	9500-220000€
Зона термовлияния, мм	0	0,1...2	0,25...8	0,5...10	0,02
Вид воздействия	Механическое	Термическое	Термическое	Термическое	Электротермическое
Производительность	1000-30000 мм/мин	1000-25000 мм/мин	1000-4500 мм/мин	508 мм/мин	330 - 600 мм ² /мин
Стоимость услуги	70-6585 €/м (сталь, 2-100 мм)	26-450 € (сталь, 0,8-20 мм, при 100-1000 пог. м)	33-118 €/м (1-16 мм)	108-410 € (16-100 мм)	500-1550 €/ч
Точность резания, мм	±0,02...1	±0,02...1	±0,3...3	±0,5...2	±0,001...0,1
Минимальный внутренний радиус, мм	0,2...0,7	0,1...0,2	0,5...3	0,6...3	0,013...0,2
Ширина реза, мм	0,3...1,5	0,2...0,4	1...6	1,2...6	0,025...0,4
Толщина материала, мм	0,01...400	0,05...40	1...200	3...600 и > 1500-2000	0,01...400

Окончание табл. 1

Параметры способа	Резка				
	Гидроабразивная	Лазерная	Плазменная	Газокислородная	Электроэроз. проволокой
Искажение формы кромки реза, мм	0,02...0,5	0,02...0,5	0,1...3	0,1...2	0,2...12,5
Грат, мм	0...1	0...1	0,2...2	0,3...4	0
Внешний вид поверхности	Матовый	Металлический блеск	Оплавленный, окисленный	Окисленный, черный	Матовый или глянцевый

Примечание. Таблица составлена на основе данных [9-13; 15-25].

Победное шествие технологии гидрорезания сверхзвуковой струей жидкости

Достоинства гидроабразивного резания

Анализ информационных источников позволяет выявить основные достоинства ГАР:

1) отсутствие теплового воздействия на поверхностный слой изделия, так как температуры нагрева в зоне резания не превышают 60-90°;

2) отсутствие механического воздействия на разрезаемый материал и остаточных напряжений, так как силы резания не превышают 1-100 Н;

3) отсутствие коробления обработанных изделий из-за исключения причин возникновения остаточных напряжений (пп. 1 и 2) в поверхностных слоях;

4) исключение оснастки для закрепления заготовок или применение простей-

(ССЖ) объясняется уникальными характеристиками процесса.

ших прижимов при обработке легких пакетов материалов;

5) биосферосовместимость технологии (по В.А. Ильичеву, РААСН [14]);

6) экологически чистая технология (нет вредных выбросов и газов);

7) универсальность процесса (можно резать любые материалы, в том числе прозрачные и светоотражающие (оптоволоконно, медь, алюминий), проводники и диэлектрики, твердые, мягкие, хрупкие, камни, бетон, сотовые, стекло- и углепластики, резину, бумагу, текстиль и т.д.);

8) малый отход материала из-за очень тонкого реза, а следовательно, высокий коэффициент использования материала.

Состояние рынка гидрорежущего оборудования

Мировой рынок гидрорежущего оборудования, по прогнозам аналитиков компании Global Industry Analysts, Inc. [15], к 2020 году достигнет \$1,15 млрд. Крупнейшим игроком на этом рынке являются США. На втором месте находится ЕС. Ныне наблюдается быстрое развитие рынка в Азиатско-Тихоокеанском регионе (АТР) (Китай, Тайвань, Индия и Вьетнам). Среднегодовые темпы роста рынка в АТР в 2006-2012 гг. составили 11%. Последнее обусловлено перемещением производств в эти более дешевые по затратам страны из экономически развитых государств Европы и Америки, развитием автомобильной промышленности, общим ростом капи-

тальных вложений в аэрокосмическую, горнодобывающую, строительную индустрию, морской транспорт. Немаловажную роль играет стабильное экономическое развитие Китая, Южной Кореи, Индии, Малайзии и Тайваня.

Высокий среднегодовой темп роста мирового рынка гидрорежущего оборудования с 2013 по 2020 г. в объеме 9,3% прогнозирует и исследовательская компания TechNavio (UK) [16].

Анализ рынка гидрорежущего оборудования в 1996 г. основывался на данных 33 основных компаний-производителей (табл. 2). Все они представляли ЕС.

Таблица 2

Компании - производители оборудования для резания ССЖ [17; 18]

Компания	Страна	Компания	Страна	Компания	Страна
ABB I-R WaterJet	Германия	Hethon	Германия	Woma	Германия
Alba	Германия	Klause-Biagosch	Германия	Rotech Bazel	Швейцария
Camtec	Германия	Kuka	Германия	Bistronic	Швейцария
Durrkopp	Германия	Lectra	Германия	Abra	Швейцария
GHT	Германия	Uhde	Германия	Jet CutSistems	Швейцария
Esab-Hancock	Германия	Metec	Германия	Kohel	Швейцария
Flexicon	Германия	Reis	Германия	Coman	Италия
Flow	Германия	Ridder	Германия	LST/ELB	Австрия
Foracon	Германия	Trumpf	Германия	Innoweld	Австрия
Grob-Werke	Германия	TSK Kamphoff	Германия	Ritschka&Sucharda	Австрия
EdelSystemtechnik	Германия	LVDScharring-shausen	Германия	MechanicSystems	Великобритания

Появляющиеся новые компании в разных странах, с одной стороны, обуславливают рост глобальной конкуренции, а с другой - способствуют развитию и продвижению технологий гидрорезания в другие регионы и отрасли, обеспечивают постепенное снижение стоимости оборудования и технологических операций и их

доступность широкому кругу предприятий и предпринимателей.

Системный ежегодный анализ мирового рынка оборудования для резания ССЖ через 10 лет, начиная с 2006 года [15], включает уже 69 основных и 75 филиалов компаний США, ЕС, АТР (табл. 3).

Таблица 3

Компании - производители оборудования ГАР (фрагмент)

Компания, web-сайт	Примеры моделей	Примечания
(US) Flow International Corporaion, www.flowwaterjet.com	FLOW Mach3b; FLOW Mach 4C; 3D-Flow AF Series. Клиенты: NASA, Boeing, Airbus, GE, Subaru и др.	На рынке с 1974 г.; >12тыс.ст. (РФ - >80 ст.); 1000 чел.; 5-осевая РГ. Патенты > всех компаний
(US) Omax Abrasive Waterjets, www.omax.com	OMAX MicroMAX; 2626; 2652; 5555; 55100; 60120; OMAX Mobile JMC; MAXIEM 0707	Основана в 1993 г. Производит станки, контроллеры, ПО, насосы и столы
(US) Jet Edge, www.jetedge.com	Jet Edge EDGEX-5; использована при отрезке голов. части нефт. скважин	Основана в 1984 г., ГАР (5-осевая)
(US) MultiCam, www.multi-cam.com/waterjet.html	WaterJet Series V; 1000, 3000, 6000, 5-осевой: 5-202-W	На рынке с 1989 г., 7000 ст. в 50 странах, 70 сервис-центров в мире
(US) Ingersoll Rand, www.ingersollrand.com	Насосы высокого давления (НВД)	130 лет на рынке
(US) ESAB Welding&Cutting Productions, esabna.com	Hydrocut LX	112 лет на рынке; 8700 работников
(US) International Waterjet Machines, www.iwmwaterjet.com	WC5WA1313H; WC5 WA3020H; WIP5	> 30 лет на рынке
(US) Semyx, www.semyx.com	Phantom®Series Infinity®Series; Cobra®Series; Optima®Series; Scorpion®Series; Genesis® Series	Основана в 2011 году; 11-50 сотрудников
(US) Sugino Corporation, www.suginocorp.com	Katana 2; C1516TN; C2516NN-T	Минимальный диаметр сопла - 0,3 мм, P=392 МПа
(US) KMT Waterjet Systems, www.kmt-waterjet.com	НВД и трубы, РГ, г/абразивные системы; оригинальные запчасти	На рынке с 1971 г.; 2003 г. – KMT приобретает INGERSOLL RAND-Waterjet, глобальная сеть услуг
(US) Koike Aronson Inc., www.koike.com	Koikejet E 60x120, Koikejet Pro	Основана в 1818 г.
(DE) Trumpf Gruppe, www.trumpf.com	Trumpf WS4020; Trumatic WS 2500	Основана в 1923 г. Оборот ~ €2,72 млрд, 10% - на инновации; 11тыс. чел.; 1074 ученых

Продолжение табл. 3

Компания, web-сайт	Примеры моделей	Примечания
(DE) Knuth Machine Tools, www.knuth.de	Hydro-JetEco 0515 SL; Hydro-JetEco 1313	На рынке с 1923 г.; 5-осевая ПГ; 2D, 3D ПГ (угол до 60°)
(DE) H.G.RIDDER Automatisierungs-GmbH, www.waterjet-ridder.com	WARICUT micro-max	На рынке с 1980 г. С 1991 г. – ГАР; 2D, 3D
(DE) Maximator Jet GmbH, www.maximator-jet.de	EcoCut, MasterCut, PremiumCut; 3D, НВ 3D; MicroCut, CombiCut 2D+3D, RobotCut	Основана в 1999 г.
(DE) Trenntec	Установка Quickjet: P=380 МПа; расход – 2,6 л/мин;	Точность позицион-я - 0,1 мм/1 м длины, воспроизведения - 0,05 мм
(DE) Fecken-Kirfel (Fecken-Kirfel America), www.fecken-kirfel.com	cutEXPERTdoublejet; cutEXPERTecojet – для ГАР кожи, пробки	Основана в 1870 г. Раскрой неметаллических материалов
(DE) Sato Schneidsysteme, www.sato.de	SATRONIK_WS	Основана в 1987 г.
(DE) ANT AG, http://ant-ag.com/	ГР с удаленным управлением	Основана в 1999 г. Для ВПК
(SW) Water Jet Swedenp, http://waterjetsweden.com	NC 1010 B; NC 2560S; NC4020E (B)	>30 лет на рынке; в 20 странах >650 станков; 1957 - 1-й станок
(SW) Finecut AB (группа WJS), www.finepart.com	Прецизионные станки: FA.W300, FAW200	В 2012 г. приобретена Finepart Sweden AB
(SW) KIMTECH-Kimblad Technology AB, www.kimtech.se	1 jet (2x1 м), Jet 1-2 (3x2 м); 2-4 jet (6x3)	Основана в 1980 г. От 0,5x1 м до 4x20 м
(SH) Bystronic, www.bystronic.com (1994 г. , концерн Conzeta)	ByJetFlex 1530, 4030...10030; ByJetPro 3015CNC	Основана в 1964 г. Оборот: €480 млн.; 1595 чел. в 30 странах. 3D
(ES) TCI Cutting, www.tci-cutting.com (бренд - TCIwaterjet)	Портальные и консольные станки серий: BP-C, S, M; SM-C, S, M	Основана в 2001 г.
(CZ) PTV SPOL. sr.o., www.ptv.cz	Progress Jet; Progress Jet II 60°; Cobra PTV, New Line, Smart Jet II-L, Smart Jet II-S, Uni Jet (ПО – PTV и Siemens)	Создана в 1991 г. на базе пред-ва FlowInt; 50% элементов - США (НВД и арматура); > 800 станков
(IT) Waterjet Corporation, waterjetcorp.com	Серия SUPREMA, CLASSICA, PRATICA	На рынке с 1991 г.
(IT) Caretta Technology, caretta.it	M1, M2 Waterjet; M5 WaterjetActiv; Poseidon Waterjet	17 лет на рынке. Оборот - 40 млн евро, 60 ст./год, в том числе waterjet + plasma; 3/5-осевые ст.
(FI) Muototerä Oy, www.muototerä.fi	FinJet™ H6020 3D; FinJet™ H6030 PCU	Основана в 1953 г.; FinJet™ R, где R – с ПП; > 400 ст. за 10 лет
(TR) Durmazlar, durmazlar.ru/ct_waterjet	СТ Durmazlar: S-Standart; R-HP; 5-осев. станки	Комплекующие фирмы КМТ
(NL) Resato, www.resato.com	ACM 2015, 3015, 3080, 3000-series Pierce Drill Unit DR-4	25 лет на рынке; 2D и 2,5D ПГ (α - до 55°)
(LV) Kenner, www.kenner.lv	KENNER KWJ-3015; 1500x6000	НВД КМТ Waterjet Systems
(FI) Alico Automation Oy	Alico Water Cut	-
(FR) Digital Control	Станок с НВД мощностью 22 кВт. Размеры: 1500x1000 мм	P=380 МПа; система управления - Cyborg 2000
(AU) Techni Waterjet, www.techniwaterjet.com/	Techjet X2 series. Клиенты: Ford, Toyota Motor Company, GM, Kodak, Kimberly Clark	На рынке >27 лет, >1000 ст., 25 стран, собственные патенты
(CH) Dardi International Corporation, www.dardi-waterjet.com	DWJ46126BB2; DWJ3020 X5; DWJ3020BB(58 продуктов, в том числе и 4/5-осевые ст.)	В 1996 г. – 1-й станок. Лидер в КНР; >40 патентов; >2000 ст.; 2D/3D динам. резка; α - до 90°
(CH) Teen King	Портальное исполнение - 21 мод.; ТК-Trump50-C0810	Консольное исполнение -13 мод.
(IT) BelottiSpA, www.belotti.com	Серия WING Jet; Belotti 5Achs / 3D	3, 5-осевые обработ. центры
(CZ) Rychly Tom s.r.o., www.rychlytom.com	BlueLine (высокоточные ст.), Green-Line (бюджетная версия, 3D)	Основана в 2006 г. RedLine (с ПГ до 60°), JetLine – 10 ПГ
(IN) Ainnovativ International, www.ainnovative.co.in	MCM-09; WJC 03	-
(CH) SAME, www.samewaterjet.com	50HD-2015; 50HA-4020	Основана в 1997 г.

Окончание табл. 3

Компания, web-сайт	Примеры моделей	Примечания
(JP) Mitsubishi Electric	MWX3; MWX4 Mitsubishi Suprema, DX612, 700 Series CNC	Насос S-50 KMT, P= 420 МПа
(CH) HEAD, www.headwaterjet.ru	HEAD 1520 Waterjet; HEAD 2030 BA	Портальные, консольные, роботизированные станки, 5-осевая PГ
(US) Hypertherm, www.hypertherm.com	Hypertherm Hy Precision 15, 30, 50, 50S, 60S, 75S, 100D, 150D.	Насосы высокого давления от 15 до 150 л.с., прецизионные PГ, ПО
(EE) Baltic Steel, http://www.balticsteel.ee/ru	Услуги по ГАР на NC 3000; NC 3060T Waterjet Sweden AB	Основана в 2000 г. (Таллинн)
(US) International Waterjet Parts, Inc., www.iwpwaterjet.com ; www.optaminerals.com	Комплекующие к станкам различных фирм, абразивы	Для Flow, KMT, WSI, Bystronic, JetEdge, OMAX, Technocut. Входит в Opta Minerals Company
(US) Accu Stream, accustream.com	Запчасти и аксессуары для Flow, JetEdge, KMT, OMAX, и WSI	2013 г. – приобретена Hypertherm, США
(AT) STM Stein-Moser GmbH, www.stm.a	Системы EcoCut, MasterCut, Premium Cut и др.	Модульные системы конструирования
(IT) Technocut	IDRO 1740 Waterjet	-
(DE) Foracon	ForaconWS 3 16/30/2.07	-

С появлением новых компаний - производителей оборудования для ГАР растет и количество предприятий, специализирующихся на изготовлении запасных частей, комплектующих, различных компонентов, оказывающих сервисные услуги. Кроме указанных в табл. 3 можно назвать небольшие, но уже известные компании, такие как Thueringer (DE), UHDE (DE), BNDT BFT GmbH (AT), H2OJet (US), Allfi (SH). Станки для ГАР изготавливают и ряд трансконтинентальных мультипродуктовых корпораций, например Toshiba Machine и Mitsubishi Corporation.

Доминирующее положение занимают в настоящее время компании Flow, Omaxi Dardi, которым принадлежит более 60% мирового рынка оборудования ГАР. Компании КНР осуществляют поставки во многие страны мира, часто вытесняя конкурентов за счет значительно меньшей цены на оборудование.

Современные комплексы для ГАР с ЧПУ имеют высокоразвитый пользова-

тельский интерфейс, обеспечивающий простоту работы операторам, оснащены процессорами с прогрессивной микроархитектурой с многочисленными улучшениями (в том числе и 3D-печать), что способствует экспансии гидрорежущих технологий в серийное и мелкосерийное производство.

Комплексы ГАР можно классифицировать по виду разрезаемых материалов и количеству осей перемещения режущей головки: для 1D-резки рулонных материалов, 2D-резки листовых материалов, 3D-резки для трехмерных объектов и специальные компоновки и решения. Все они могут быть оснащены 1D - 3D режущими и сверлильными головками.

Важным требованием к таким комплексам является обеспечение точности и стабильности скорости абразивного потока. Их цена возрастает с количеством головок, ростом универсальности, точности и давления струи.

Современные тенденции развития рынка

Новыми трендами в развитии оборудования и технологий ГАР можно считать:

- появление на рынке оборудования для микроГАР сверхвысокой точности;
- использование ГАР в точном машиностроении и приборостроении, в том числе в часовой промышленности, микро- и нанoeлектронике [19];

- создание комплексов для трехмерного (3D) гидрорезания, в том числе для высокоточной резки;

- создание комплексов ГАР с несколькими режущими головками и сверлильной насадкой;

- роботизацию гидроабразивной обработки;

- оснащение программным обеспечением нового поколения современных комплексов ГАР и создание высокоразвитого пользовательского интерфейса, обеспечивающего простоту и легкость применения этого ПО в производственных условиях;

- рост популярности в мировой практике комплексов для ГАР небольших размеров.

Драйверы рынка: активизация научных исследований процессов гидрорезания в России и за рубежом; использование ГАР в пищевой, текстильной, строительной, горнодобывающей отраслях, медицине, при очистке корпусов судов и элементов мостов от ракушек, коксоудалении, резании нефтепроводов при ремонте и модернизации, снятии изоляции с электропроводов; усложнение форм деталей, требующих для изготовления ГАР; создание и применение новых труднообрабатываемых сверхпрочных и легких материалов в аэрокосмической, авиационной отраслях и су-

Примеры инновационных решений

Метод гидрорезания микроструей Вальтера Маурера. Большой вклад в расширение рынка ГАР сделали компании Waterjet AG (разработчик В. Маурер) и Daetwyler Industries (производитель, Швейцария). Им удалось создать наиболее точные в мире технологию и оборудование для ГАР (микрорезания) с точностью позиционирования менее 1 мкм. Диаметр струи уменьшен с 0,5 до 0,3 мм, ширина среза составляет порядка 0,3 мм, используется тончайший гранатовый абразив. Гарантированная воспроизводимость размеров составляет ± 1 мкм/100 мм, шероховатость - Ra 0,8. При резании водой средняя ширина среза - 0,25 мм. Метод сопоставим по точности с резкой лазером и может применяться даже для изготовления деталей ручных часов и печатных плат. Компании работают над уменьшением диаметра струи до 0,1 мм и широким использованием технологии во многих областях техники и технологий [20].

Идея В. Маурера была подхвачена в Германии путем создания компании DeStamicrocut GmbH&Co. KG, которая од-

достроении; расширение областей применения композиционных материалов в авиации, автомобилестроении, судостроении и оборонно-промышленном комплексе с использованием ГАР; применение углепластиков, требующих использования ГАР; активный рост в разных странах компаний, предлагающих сервисные услуги по ГАР; использование ГАР при утилизации подводных лодок и различных видов боеприпасов; применение МЧС при природных и техногенных авариях и катастрофах; широкий диапазон цен на оборудование для ГАР различных производителей; появление на рынке альтернативных гранату абразивных материалов.

Конечно, кризисные явления в мировой экономике тормозят развитие рынка ГАР во всех странах. Санкции в отношении российских компаний приводят к переориентации на оборудование для ГАР из восточных стран, в первую очередь из Китая.

ной из первых в стране занялась продвижением технологии высокоточной гидрорезки микроструей в промышленность [21]. DeSta использует для поддержания постоянной температуры жидкости термостат, а сам процесс для погашения шума резания происходит под водой.

Для больших деталей размерами 10x3 м, весом до 30 т и толщиной более 150 мм компания Bystronic (Швейцария) разработала станок ByJetClassic L. Увеличение рабочего давления в нем с 360 до 530 МПа повысило производительность резки на 40 %, что актуально при больших габаритах заготовок. Однако возможен второй вариант реализации процесса: при давлении 360 МПа обработку производят 4 режущими головками одновременно. Производительность резки при этом увеличивается на 100–300 %. Станки позволяют легко перестраиваться из 2D в 3D на единой платформе, а также использовать сразу две 3D-головки (ByJetFlex) параллельно, что расширяет спектр применения и повышает производительность.

Компактный вариант станка - BuJetSmart позволяет использование 2 автоматизированных режущих головок с ЧПУ, что сокращает время производственного цикла. Высокий КПД насоса и увеличенные межсервисные интервалы обеспечивают исключительно низкие расходы на эксплуатацию. Встроенные элементы обеспечивают компактность, а также оптимальную доступность рабочей зоны с нескольких сторон. Оборудование отличается невысокой стоимостью благодаря оптимальному набору рабочих модулей [22; 23].

Гидрорезание неметаллических материалов. Прокладочные материалы. Прецизионная гидроабразивная резка позволяет филигранно изготавливать прокладки самых различных форм из любых материалов с наименьшими затратами и временем.

Волокнистые материалы. Даже самые твердые материалы или фазерматериалы, которые осыпаются по краям при обычной резке, например кевлар, могут быть обработаны прецизионной гидроабразивной резкой с высочайшим качеством кромки. Проблема износа режущего инструмента полностью исключена.

Композитные материалы сочетают свойства различных материалов. Такая комбинация трудно поддается классическим методам обработки, а иногда обработка невозможна в принципе. ГАР идеально подходит для обработки подобных материалов, так как не нарушает их склейки и слоистости.

Твердые материалы. Керамика, стекло, полимеры, цветные металлы, элементы электроники и композиционные материалы, которые требовали больших финансовых затрат при обработке традиционными способами, теперь могут быть экономично и быстро обработаны ГАР [24].

Освобождение пострадавших при авариях. Важным применением ГАР явля-

ется освобождение пострадавших из бронированных автомобилей, например инкассаторской техники, автомобилей VIP-персон и гусеничных машин, перевозящих нефтепродукты и взрывоопасные вещества и материалы, при их повреждениях и деформации [25].

Обеззараживающее действие. Исследования в МГТУ им. Н.Э. Баумана [26; 27] показали, что ультразвуковая обработка: повышает функциональную активность смазочно-охлаждающих технологических средств при металлообработке; оказывает сильное диспергирующее и стабилизирующее действие на трудно смешиваемые эмульсии; оказывает обеззараживающее действие на обрабатываемую жидкость. При этом эффект от стерилизации, например, воды сохраняется в течение минимум года. Бактерицидное действие струи авторы объяснили ударно-динамическим, акустико-волновым эффектом стерилизации и сопутствующими ему явлениями химической и электромагнитной природы.

Роботизация ГАР. Автоматизация процесса ГАР за счет использования роботов обеспечивает повышение производительности до 40%. Это обеспечивается за счет значительно большей скорости работа на холостом ходу, чем при перемещениях режущей головки на традиционных гидроустановках [28]. Наиболее предпочтительными областями применения гидророботов являются автомобильная, аэрокосмическая, пищевая, электронная, текстильная и упаковочная промышленность.

Это далеко не полный перечень возможностей использования ГАР. Поиск инновационных решений в этой области продолжается во многих странах. Так, появилась информация о работе над созданием гибридных технологий типа «струя - лазер», которые сочетают лучшие выходные характеристики каждого из процессов.

Выводы

Возрождение отраслей машиностроения и ОПК невозможно без появления новых инновационных производственных технологий. Одним из наиболее популярных и современных методов обработки ма-

териалов является гидрорезание на сверхзвуковых скоростях. Практика зарубежных и отечественных компаний показала, что ГАР представляет собой наиболее универсальную технологию резания разных видов

материалов. Динамика развития мировых рынков ГАР говорит о больших перспективах развития этой технологии в наукоемких отраслях промышленности. Внедрение прецизионных технологий ГАР позволит не только расширить технологические

возможности отечественного оборудования, повысить качество выполняемой обработки и снизить ее себестоимость, но и расширить область использования ГАР на предприятиях со значительным экономическим эффектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова, Е.Ю. Инновации и наукоемкие технологии в многофункциональном холдинге по производству текстильных строп и комбинированных канатов (на примере ЗАО «Промсталь», г. Орел) / Е.Ю.Степанова, В.И. Мельников // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – №3 (299). – С. 93-101.
2. <http://www.operato.ru/content/view/3355/17> (дата обращения: 15.08.2016).
3. Степанова, Е.Ю. Экспортные ограничения США и ЕС как стимул к развитию наукоемких и высокотехнологичных секторов экономики / Е.Ю.Степанова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – № 3. – С. 96 – 103.
4. Степанова, Е.Ю. Наукоемкие отрасли и высокие технологии – основа технологической безопасности и независимости страны / Е.Ю.Степанова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – № 2. – С. 122 – 132.
5. Степанова, Е.Ю. Высокие технологии в инновационной экономике / Е.Ю.Степанова, Л.И.Поландова // *Известия Орловского государственного технического университета*. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2007. – 3/267 (533). – С. 156–167.
6. Маслова, И.А. Инновационная стратегия: сущность, критерии выбора / И.А.Маслова // *Экономические и гуманитарные науки*. – 2014. – №5 (268). – С. 23-27.
7. Степанова, Е.Ю. Маркетинг инноваций: проблемы и решения / Е.Ю.Степанова, Ю.С.Степанов // *Экономические и гуманитарные науки*. – 2011. – № 12. – С. 24-31.
8. Попова, Л.В. Приоритеты инновационного общества и перспективы модернизации экономики: региональный аспект / Л.В.Попова // *Экономические и гуманитарные науки*. – 2011. – № 4 (231). – С. 3-13.
9. Тенденции рынка обрабатывающей индустрии: Гидроабразивная резка – новая эра промышленных технологий // *Металлообработка и станкостроение: Мир станков и технологий*. – 2015. – №5. – С. 38-39.
10. Степанова, Е.Ю. Оценка эффективности технологий раскроя машиностроительных текстильных материалов / Е.Ю.Степанова, М.А.Бурнашов // *Авиационно-космическая техника и технология: тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е.Жуковского «ХАИ»*. – Харьков: ХАИ, 1999. – Вып. 11. – С. 8 – 10.
11. Степанов, Ю.С. Разрушение преграды сверхзвуковым потоком свободных абразивных частиц / Ю.С.Степанов, Г.В.Барсуков, А.В.Михеев. – М.: Спектр, 2010. – 149 с.
12. Степанов, Ю.С. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технических тканей / Ю.С.Степанов, Г.В.Барсуков. – М.: Машиностроение, 2004. – 240 с.
13. Stepanov, Yu.S. Technological fundamentals for efficiency control of hydroabrasive cutting / Yu.S. Stepanov, G.V.Barsukov, S.G.Bishutin // *International Conference on Industrial Engineering (ICIE)* – 2016. *Procedia Engineering*. – 2016. – № 150. – P. 717 – 725.
14. Ильичев, В. А. Биосферная совместимость. Технологии внедрения инноваций. Города, развивающие человека / В.А.Ильичев. – М.: Либроком, 2011. – 234 с.
15. http://www.strategyr.com/MarketResearch/Waterjet_Cutting_Machines_Market_Trends.Asp (дата обращения: 15.08.2016).
16. Kuvin, Brad F. Manufacturers Keep the Waterjet-Cutting Technology Developments Flowing / Brad F. Kuvin // *MetalForming*. – 2014, March. – P. 22-23. – Режим доступа: www.metalformingmagazine.com (дата обращения: 15.08.2016).
17. Потапов, В.А. Струйная обработка: состояние и перспективы развития в Европе и мире / В.А.Потапов // *Машиностроитель*. – 1996. – №1. – С. 36-41.
18. Степанов, Ю.С. Технология раскроя сверхзвуковой струей жидкости технических текстильных материалов и композиций на их основе, применяемых в транспортном машиностроении // Ю.С.Степанов, А.П.Черепенько, М.А.Бурнашов // *Справочник. Инженерный журнал*. – 1999. – № 1. – С. 3-6.
19. Молчанова, Е.С. Сравнение плазменного, гидроабразивного и лазерного способов резки и прошивки конструкционных материалов в радиоэлектронной промышленности / Е.С.Молчанова, Н.А.Бычков, С.И.Черняев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 6 (302). – С. 58-62.
20. Скачок в новое измерение // *Металлообработка и станкостроение: Мир станков и технологий*. – 2011. – № 6. – С. 38-39.
21. <http://www.desta-microcut.de> (дата обращения: 15.09.2016).

22. Решения Bystronic для гидрорезки: от микро к макро // *Металлообработка и станкостроение: Мир станков и технологий.* – 2011. - № 3. - С. 38-41.
23. <http://www.bystronic.com/ru> (дата обращения: 15.09.2016).
24. Особенности обработки неметаллических материалов на установках гидроабразивной резки MWJ F4 & C4 // *Металлообработка и станкостроение: Мир станков и технологий.* – 2014. - № 11. - С. 41-42.
25. Абашин, М.И. Применение гидроабразивного резания для освобождения пострадавших в ДТП / М.И.Абашин, П.И.Саркисов // *Наука и образование.* - 2011. - № 8. - Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/224593.html> (дата обращения: 02.02.2016).
26. Барзов, А.А. Перспективы ультраструйной гидротехнологии получения активированных микро- и наносуспензий / А.А.Барзов, А.Л.Галиновский, О.Е.Балашов // *Наноинженерия.* - 2011. - №2. - С. 3-6.
27. Барзов, А.А. Технологии ультраструйной обработки и диагностики материалов / А.А.Барзов, А.Л.Галиновский. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 246 с.
28. <http://ds-robotics.ru/sections/robotyi-v-proizvodstve/rezka-gidroobrazivnaya.html> (дата обращения: 15.08.2016).
1. Stepanova, E.Yu. Innovations and high technologies in multi-functional holding for manufacturing textile straps and combined ropes (by the example of CC “Promstal” Co., Orel) / E.Yu.Stepanova, V.I. Melnikov // *Fundamental and Applied Problems of Technique and Technology.* – 2013. - №3 (299). – pp. 93-101.
2. <http://www.operato.ru/content/view/3355/17> (access date: 15.08.2016).
3. Stepanova, E.Yu. Export limitations of the USA and the EU as an incentive to development science intensive and high technological sectors of economy / E.Yu.Stepanova // *Fundamental and Applied Problems of Technique and Technology.* – 2014. - № 3. – pp. 96 – 103.
4. Stepanova, E.Yu. Science intensive branches and high technologies – basis of technological safety and country independence / E.Yu.Stepanova // *Fundamental and Applied Problems of Technique and Technology.* – 2014. - № 2. – pp. 122 – 132.
5. Stepanova, E.Yu. High technologies in innovation economy / E.Yu.Stepanova, L.I.Polandova // *Proceedings of Orel State Technical University. Fundamental and Applied Problems of Technique and Technology.* - 2007. - 3/267 (533). - pp.156–167.
6. Maslova, I.A. Innovation strategy: essence, criteria of choice / I.A.Maslova // *Economy Sciences and the Humanities.* – 2014. - №5 (268). – pp. 23-27.
7. Stepanova, E.Yu. Innovation marketing: problems and solutions / E.Yu.Stepanova, Yu.S.Stepanov // *Economy Sciences and the Humanities.* - 2011. - № 12. - pp. 24-31.
8. Popova, L.V. Priorities of innovation society and outlooks of economy modernization: regional aspect / L.V.Popova // *Economy Sciences and the Humanities.* - 2011. - № 4 (231). – pp. 3-13.
9. Trends of processing industry market: hydroabrasive cutting – new era of industrial technologies // *Metal-working and Machine Tool Industry: World of Machines and Technologies.* - 2015. - №5. - pp. 38-39.
10. Stepanova, E.Yu. Assessment of cutting technology efficiency of engineering textile materials / E.Yu.Stepanov, M.A.Burnashov // *Aerospace Engineering and Technology: Proceedings (Transactions) of Zhukovsky Aerospace University “KhAI”.* - Kharkov: KhAI, 1999. - Ed. 11. - pp. 8 - 10.
11. Stepanov, Yu.S. *Obstacle Destruction by Supersonic Jet of Free Abrasive Particles* / Yu.S.Stepanov, G.V.Barsukov, A.V.Mikheev. – М.: Spectrum, 2010. – pp. 149.
12. Stepanov, Yu.S. *Current Technological Processes of Mechanical and Hydro-jet Cutting of Engineering Fabrics* / Yu.S.Stepanov, G.V.Barsukov. - М.: Mechanical Engineering, 2004. – pp. 240.
13. Stepanov, Yu.S. Technological fundamentals for efficiency control of hydroabrasive cutting / Yu.S. Stepanov, G.V.Barsukov, S.G.Bishutin // *International Conference on Industrial Engineering (ICIE) - 2016.* Procedia Engineering. – 2016. - № 150. – P. 717 – 725.
14. Ilchyov, V. A. *Biosphere Compatibility. Technology of Innovation Introduction. Human Developing Towns* / V.A.Ilchyov. – М.: Librocom, 2011. – pp. 234.
15. <http://www.strategyr.com/MarketResearch/WaterjetCuttingMachinesMarketTrends.asp> (access date: 15.08.2016).
16. Kuvin, Brad F. *Manufacturers Keep the Waterjet-Cutting Technology Developments Flowing* / Brad F. Kuvin // *MetalForming.* – 2014, March. - P. 22-23. – access mode: www.metalformingmagazine.com (access date: 15.08.2016).
17. Potapov, V.A. *Jet Processing: State and Development Outlooks in Europe and in the World* / V.A.Potapov // *Mechanical Engineering.* – 1996. - №1. – pp. 36-41.
18. Stepanov, Yu.S. *Cutting technology with supersonic jet of engineering textile materials and their composites used in transport engineering* // Yu.S.Stepanov, A.P.Cherepenko, M.A.Burnashov // *Reference Book. Engineering Journal.* – 1999. - № 1. – pp. 3-6.
19. Molchanova, E.S. *Comparing plasma, the guide-roabrasivnogo and laser methods of cutting and a firmware of constructional materials in the radio-electronic industry* / E.S.Molchanov, N.A.Bychkov, S. I. Chernyaev//*Fundamental and*

- application-oriented problems of technique and technology. - 2013. - No. 6 (302). - Page 58-62.
20. A saltus in new measurement//Metal working and machine-tool construction: World of machines and technologies. - 2011. - No. 6. - Page 38-39.
21. <http://www.desta-microcut.de> (date of the address: 15.09.2016).
22. Decisions of Bystronic for hydrocutting: from micro to macro//Metal working and machine-tool construction: World of machines and technologies. - 2011. - No. 3. - Page 38-41.
23. <http://www.bystronic.com/ru> (date of the address: 15.09.2016).
24. Features of processing of nonmetallic materials on installations of hydroabrasive cutting of MWJ F4 & C4//Metal working and machine-tool construction: World of machines and technologies. - 2014. - No. 11. - Page 41-42.
25. Abashin, M. I. Application of hydroabrasive cutting for release of victims in road accident/M. I. Abashin, P.I.Sarkisov//Science and education. - 2011. - No. 8. - Access mode: <http://technomag.edu.ru/doc/224593.html> (date of the address: 02.02.2016).
26. Barzov, A.A. Perspectives of an ultrastruynoygidrotekhnologiya of receiving activated micro and nanosuspensions / A. A. Barzov, A. L. Galinovsky, O.E.Balashov//Nanoinzhene-riya. - 2011. - No. 2. - Page 3-6.
27. Barzov, A.A. Technologies of ultrajet processing and diagnostics of materials / A. A. Barzov, A. L. Galinovsky. - M.: MSTU of N. E. Baum-on, 2009. - 246 pages.
28. <http://ds-robotics.ru/sections/robotyi-v-proizvodstve/rezka-gidroobrazivnaya.html> (date of the address: 15.08.2016).

Статья поступила в редколлегию 02.12.2016.

*Рецензент: д.т.н., профессор
«ГУиФ» ОГУ им. И.С.Тургенева
Машегов П.Н.*

Сведения об авторах:

Степанова Елена Юрьевна, к.э.н., доцент кафедры «ГУиФ» ОГУ им. И.С.Тургенева, e-mail: eco-nauka@ya.ru.

Кожус Ольга Геннадьевна, аспирант кафедры «КТМП» ОГУ им. И.С.Тургенева, e-mail: awj@list.ru.

Stepanova Elena Yurievna, Can. Econ., Assistant Prof. of the Dep. "SM&F" Turgenev SU of Orel, e-mail: eco-nauka@ya.ru.

Kozhus Olga Gennadievna, Post graduate student of the Dep. "KTOMP" Turgenev SU of Orel, e-mail: awj@list.ru.

Барсуков Геннадий Валерьевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «КТМП» ОГУ им. И.С.Тургенева, e-mail: awj@list.ru.

Barsukov Gennady Valerievich, D. Eng., Prof., Head of the Dep. "KTOMP" Turgenev SU of Orel, e-mail: awj@list.ru.